

*На правах рукописи*



Орел Егор Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ  
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ  
СРЕДСТВ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск 2023 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном  
учреждении высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Аносов Владимир Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор  
Официальные **Пантелеев Василий Викторович**,  
оппоненты: доктор технических наук, профессор, Федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Сибирский  
федеральный университет» (г. Красноярск), кафедра  
«Электроэнергетика», заведующий кафедрой;

**Лукутин Борис Владимирович**,  
доктор технических наук, профессор, Федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный  
исследовательский Томский политехнический  
университет» (г. Томск), отделение  
электроэнергетики и электротехники, профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет  
«МЭИ» (г. Москва).

Защита диссертации состоится «21» декабря 2023 г. в 13:00 часов на  
заседании диссертационного совета 24.2.347.07 при Федеральном государственном  
бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский  
государственный технический университет» по адресу: 630073 г. Новосибирск,  
пр-т. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского  
государственного технического и на сайте организации [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » октября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Переход к электрическим транспортным средствам (ТС) – одна из главных тенденций современности. Активность в этом направлении связана со стремлением внести вклад в борьбу с проблемами загрязнения природы, ограниченности ископаемых ресурсов, доставки товаров из логистических центров до потребителей в крупных населенных пунктах с загруженным автомобильным движением, оптимизации логистических процессов на предприятиях.

Внимание к решению обозначенных проблем отражено в стратегических документах коммерческих и государственных автопредприятий. Volkswagen, например, вкладывает миллиарды евро для создания экологически чистых автомобилей с электрическими или гибридными энергоустановками. Запланировано увеличение доли продаж электромобилей до 60% к 2030 году. В рамках программы развития "*MOVE-to-2022*" Nissan стремится достичь продаж одного миллиона гибридных и полностью электрических автомобилей ежегодно. А мировой лидер индустрии электромобилей, компания *Tesla*, выпустила на рынок 1.31 миллиона автомобилей в 2022 году, что составляет почти 300%-ный рост относительно продаж 2020 года. Стратегические замыслы по распространению электромобилей в качестве составляющей части «зеленого» развития существуют и в российском нормотворчестве: 23 августа 2021 года было принято постановление Правительства РФ №2290-р, в котором рассматриваются целевые показатели по производству электрического транспорта и развитию зарядной инфраструктуры до 2030 года.

Рост промышленного производства и увеличение его объема неизбежно влечет за собой использование автоматизированных систем и роботизированных, в том числе транспортных, комплексов. Необходимо отметить, что эксплуатация транспортных средств в закрытых помещениях предполагает отказ от обычных двигателей внутреннего сгорания из-за того, что выхлопные газы могут нанести серьезный вред здоровью сотрудников. В связи с этим, всё больше ТС для использования на предприятиях выпускается с электрическими двигателями.

Одним из этапов в развитии систем автоматизации является применение автономных транспортных средств с электрическим приводом. Согласно классификации *SAE International (Society of Automotive Engineers International)* выделяют следующие шесть основных уровней автономности для продвинутых систем помощи при вождении (*ADAS – Advanced Driver Assistance System*): от 0 (ручное управление с предупреждениями об опасности) до 5 (полностью беспилотное управление без участия человека). Если автомобильный транспорт развивают до третьего или четвертого уровня по указанной шкале, то транспорт на производстве стремятся сделать полностью автономным. Среди наиболее известных отечественных исследований в области беспилотного вождения – разработка и запуск в Москве и Иннополисе беспилотного такси компанией Яндекс и начало эксплуатации беспилотных грузовиков компании КАМАЗ для доставки грузов по зимникам между стоянками в Заполярье.

Для определения оптимального управления автономным транспортным средством используются следующие критерии: минимальный расход энергии и минимальная длина пути от начальной точки до конечной на безопасном удалении от объектов окружающей среды. При работе в среде, связанной с людьми, наиболее важным фактором является безопасность. Поэтому, сначала вычисляется безопасная траектория, а потом происходит отработка желаемого движения с минимальным потреблением энергии.

С распространением электрических ТС возрастает актуальность проблемы повышения энергоэффективности электроприводов. Важную роль играет выбор системы питания. Бесконтактный подвод энергии от питающей линии к электрическому ТС является одним из наиболее перспективных способов обеспечения его энергетической автономности. В частности, большой интерес вызывает способ передачи энергии с использованием электромагнитной индукции.

**Степень разработанности темы исследования.** Тема индукционного подвода электроэнергии к ТС практически не освещена в отечественной литературе. Одни из наиболее значимых работ были опубликованы советским изобретателем Г.И. Бабатом в середине XX века. В зарубежной литературе данной теме уделяется несколько большее внимание. Основоположником идей индукционной передачи энергии считается Н. Тесла. С 1990-х годов были предложены различные системы индукционного подвода энергии (ИПЭ) для стационарных и динамических методов беспроводной зарядки электромобилей на основе индукционной связи между несколькими катушками, в том числе разработанные Оклендским университетом, США, специалистами компаний *Bombardier*, Канада, Окриджской национальной лаборатории, США. С 2009 года Корейский институт науки и технологий (*KAIST*) совершил большой прорыв в реализации технологий ИПЭ от кабеля, заложенного в дорожном полотне. Однако, ни одна из работ не предусматривает описания такого источника питания как элемента системы автоматического управления.

Вопрос энергоэффективного управления тяговым электрическим приводом на низком уровне управления (регуляторы электропривода) имеет достаточно высокую степень проработки. Вопросы теории тягового расчета были исследованы В. Е. Розенфельдом, М. П. Кутыловским. Методы энергоэффективного управления тяговым электроприводом подробно описываются в работах К. Г. Марквардта, В. П. Феоктистова, В. В. Шевченко, А. *Ruffer* и других авторов. Проблема энергоэффективного управления тяговым электроприводом является предметом исследований целого ряда учёных из Новосибирского государственного технического университета. Однако, появление новых методов реализации алгоритмов управления открывает дополнительные пути для повышения эффективности регулирования.

Системы высокоуровневого энергоэффективного управления (задание внешних сигналов управления) освещены меньше. А. А. Жук, В. М. Булойчик, С. В. Акулич исследуют систему беспилотной навигации с построением маршрута по критерию минимального потребления топлива. *Shen Z., Wilson J., Gupta S.* предлагают варианты планирования пути с учетом возврата на станцию зарядки в

случае нехватки энергии. Авторы этих работ рассматривают математические модели, позволяющие планировать энергоэффективные траектории, совмещая их с поиском наикратчайшего пути. Обширные исследования проводятся группой сотрудников исследовательской лаборатории *Mitsubishi Electric*, США. Однако, исследования в данной области требуют дальнейшей проработки, так как в современных трудах не представлены решения, удовлетворяющие одновременно критериям кратчайшего пути, безопасной траектории и энергетической эффективности.

**Целью исследования** является повышение энергоэффективности тягового электропривода автономного ТС за счёт внесения конструктивных изменений и использования энергооптимальных алгоритмов управления.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Выработка рекомендаций относительно компоновки тягового электропривода для обеспечения наибольшей энергоэффективности ТС.
2. Выбор основных элементов тягового электропривода.
3. Создание математической модели источника бесконтактной передачи энергии.
4. Разработка наблюдателей для оценки переменных состояния системы тягового электропривода на основе искусственных нейронных сетей.
5. Синтез нейросетевых регуляторов переменных состояния системы тягового электропривода с применением методики обучения нейронных сетей с подкреплением.
6. Разработка энергооптимальной системы управления автономной навигацией ТС.
7. Подтверждение теоретических наработок с помощью моделирования в среде *MATLAB Simulink*.

**Объектом исследования** является система тягового электропривода с источником бесконтактного подвода энергии и буферным бортовым накопителем энергии.

**Предметом исследования** являются математическая модель источника бесконтактного подвода энергии, алгоритмы управления тяговым электроприводом с применением методов искусственного интеллекта.

**Методы и средства проведения исследования.** При подготовке работы использовались аналитические методы и сведения из теории электрического привода, теории вероятности и математической статистики, автоматического управления, электрических машин, машинного обучения. Моделирование и последующий анализ работоспособности синтезированной системы произведены с использованием программного пакета *MATLAB Simulink* и языка программирования *Python*.

**Научная новизна работы.** Впервые были получены следующие результаты:

1. Составлено математическое описание источника бесконтактной передачи энергии как элемента системы управления тяговым электроприводом, позволяющее анализировать динамические свойства транспортного средства при изменении параметров источника питания.

2. Предложена методика оценки переменных состояния тягового электропривода с использованием искусственных нейронных сетей, что облегчает расчет и построение бездатчиковой системы управления.

3. Синтезированы регуляторы переменных состояния тягового электропривода методом обучения искусственных нейронных сетей с подкреплением, обеспечивающие энергоэффективное управление транспортным средством.

4. Предложена методика расчёта безопасной и энергоэффективной траектории ТС при объезде препятствия, использование которой, в конечном итоге, обеспечит безаварийную эксплуатацию электротранспорта.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая произвести расчёт технических характеристик для выбора тягового двигателя и буферного накопителя энергии ТС на основе выбранных циклов движения.

2. Апробирована методика использования буферного накопителя энергии с целью уменьшения потерь энергии в тяговом электроприводе.

3. Синтезирован и исследован наблюдатель крутящего момента двигателя по косвенным показателям с использованием ИНС.

4. Синтезирован и исследован нейрорегулятор момента для системы автоматического управления тяговым электроприводом электрического ТС.

Совокупность полученных **теоретических и практических результатов** может служить основой для увеличения числа научных исследований и практических внедрений автономных электрических ТС с бесконтактным подводом питания.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математические модели источника бесконтактной передачи энергии в системе тягового электропривода, используемые для анализа влияния величины воздушного зазора на динамику транспортного средства.

2. Обоснование алгоритмов управления тяговым электроприводом автономного ТС, дающее возможность выбора необходимых контуров регулирования.

3. Использование искусственных нейронных сетей для расчёта переменных состояния системы тягового электропривода, позволяющее построить бездатчиковую многоконтурную систему управления.

4. Синтез нейрорегулятора момента в системе тягового электропривода автономного ТС, отличающейся от существующих наличием контура момента.

5. Выбор бортового накопителя энергии и разработка регуляторов для его управления с целью уменьшения бросков тока и снижения потерь энергии, а также для его использования при исчезновении напряжения питания.

6. Анализ динамических свойств синтезированной системы тягового электропривода с комбинированной энергоустановкой с целью подтверждения проведенных расчетов и необходимости применения бортового накопителя энергии.

7. Результаты использования элементов технического зрения для задания управляющих сигналов на систему тягового электропривода в соответствии с выбранным критерием оптимальности.

**Достоверность полученных в работе результатов** подтверждена структурным, имитационным и физическим моделированием исследуемой системы.

**Публикации и апробация работы.** Результаты диссертационного исследования опубликованы в 8 научных работах, среди которых: публикаций в журналах из перечня ВАК РФ – 4; публикаций в журналах, индексируемых базой Scopus – 1; свидетельств о регистрации программы для ЭВМ – 1.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на II Международной научно-технической конференции «Smart Energy Systems 2021» (SES-2021, Казань), открытой лекции для студентов университета Цзинганшань (Китай, 30.11.2022), XI Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (2017, Новосибирск), XXVI региональной научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири» (2018, Новосибирск), научных сессиях НГТУ (Новосибирск, 2020-2023).

**Личный вклад автора.** Представленные в работе исследования были проведены автором лично или под его непосредственным руководством. Автор участвовал в постановке задач, выборе методов и обосновании их применения, а также анализировал и интерпретировал полученные результаты.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Текст работы написан на 153 страницах, содержит 69 рисунков и 10 таблиц. Список литературы включает 219 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** работы посвящена анализу существующих средств и методов повышения энергетической эффективности автономных ТС.

Понятие автономности включает в себя два ключевых компонента. Первый – возможность ТС работать с автономным источником питания (ИП). Ключевым аспектом для изучения здесь является возможность выравнивания тока разряда ИП с целью увеличения дальности пробега без подзарядки. Второй – способность ТС планировать оптимальный путь для перемещения от начального до желаемого положения, исключая столкновения с препятствиями и удовлетворяя заданным кинематическим и динамическим ограничениям исходя из выбранного критерия оптимальности.

Энергоэффективность ТС напрямую зависит от типа энергоустановки транспортного средства. Использование источников бесконтактного подвода электрической энергии от питающей сети является наиболее гибким и универсальным подходом. За счет его применения удастся добиться как увеличения запаса хода, так и свободы перемещения транспортного средства.

Суть подхода заключается в передаче энергии от ИП, расположенных в дорожном полотне. С помощью различных физических законов в электромобиле, на котором установлена ответная часть – приемник, переданная энергия различных

видов преобразуется в электрическую, которая далее запасается в аккумуляторных батареях и расходуется на работу электроприводов. Наиболее предпочтительным для использования в тяговом электроприводе является индукционный способ передачи энергии.

Согласно обзору научных статей, наиболее эффективные технические решения могут передавать до 90% энергии без потерь на расстоянии порядка 20 см. Индукционный способ передачи энергии от заложенного в дорожное полотно кабеля активно применяется коммерческими структурами Израиля, Германии, Франции, США.

Кроме того, в работе был произведен анализ различных компоновок системы тягового электропривода ТС. Распределенный привод колёс обеспечивает возможность независимого управления частотой и моментом вращения каждого колеса в отдельности. Это достигается за счет одновременного управления несколькими электрическими двигателями. Одним из вариантов реализации распределенной системы тягового привода является использование мотор-колёс (рисунок 1).

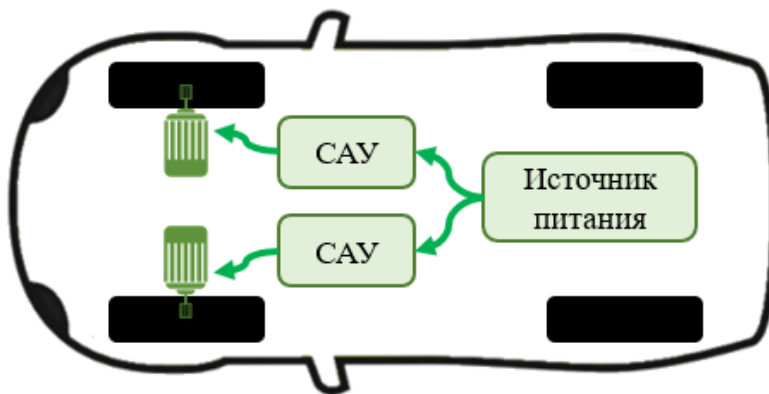


Рисунок 1 – Схематическое изображение распределенной тяговой системы в автономном электрическом ТС на основе двух ведущих мотор-колес.

Дальнейший анализ вариантов применения электрических машин в качестве основного элемента тягового электропривода мотор-колёс показал наивысшую перспективность использования *BLDC*-двигателей с целью повышения энергоэффективности ТС.

Зачастую в задачах управления электроприводом помимо главной переменной необходимо управлять несколькими промежуточными, поэтому в САУ организуются несколько контуров управления со своими регуляторами. В последние годы все большее применение находит новое направление в регулировании координат электропривода — нейросетевые регуляторы, которые базируются на понятии искусственной нейронной сети (ИНС). Преимуществом нейронных сетей перед традиционными алгоритмами управления является их обучаемость. При успешном обучении ИНС может предсказать верный результат несмотря на отсутствие некоторых данных в обучающей выборке, а также при неполных или частично искаженных данных.

Одним из перспективных является метод обучения нейросетей с подкреплением. Его суть заключается в том, что методом проб и ошибок, совершая выбранные алгоритмом из заранее заданного набора возможных действия, агент



оказывает влияние на рабочую среду, стремясь максимизировать (или минимизировать) значение целевой функции. Обзор литературы показывает перспективность использования нейрорегуляторов на базе данного метода.

Таким образом, в результате проведенного анализа существующих средств и методов повышения энергетической эффективности автономных ТС предлагается исследовать четырехколесное ТС с двумя ведущими мотор-колёсами на базе *BLDC*-двигателей. Энергоустановка данного ТС представляет собой бесконтактный индукционный ИП и буферный накопитель энергии. Для повышения энергоэффективности системы управления тяговым электроприводом используется нейросетевой регулятор момента.

**Вторая глава** посвящена расчёту основных характеристик тягового электропривода.

В качестве объекта исследования принято транспортное средство массой 3 тонны (автомобиль марки «Газель») и габаритами: ширина 2.067 м, высота 2.137 м, колесами 175/35R15 диаметром 0.47 м – выбор основных элементов которого производится на основе анализа циклов движения.

На основании обзора существующих циклов движения транспортных средств установлено их различие в зависимости от условий эксплуатации. В частности, движение в городской среде имеет большее число разгонов и торможений, а также более низкие скорости по сравнению с быстрыми загородными циклами движения, характеризующимися большей продолжительностью установившихся режимов работы.

Наиболее современным и приближенным к реальному считается европейский стандартизированный набор циклов движения *WLTP* (*Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure*). Для исследования в данной работе был выбран цикл *WLTP Class 1*, описывающий динамичную езду в городской черте и предусматривающий разгон до 60 км/ч.

Для определения необходимой мощности тягового электродвигателя на основе выбранного цикла движения ТС было использовано два метода: метод среднеквадратичной мощности и метод статистического анализа.

Метод расчета среднеквадратичной мощности позволяет увидеть усредненную картину для всего цикла. При исследовании тягового электропривода со значительными колебаниями переменных состояния на длинных отрезках времени данный метод отсекает информацию об экстремальных значениях и не дает объективной картины.

Методы статистического анализа, напротив, позволяют учесть все изменения координат исследуемого электропривода и наиболее точно определить мощность электродвигателя. Для этого с использованием инструментов языка программирования *Python* была рассчитана функция распределения нормального случайного процесса изменения требуемой мощности на ободу колеса ТС (рисунок 2).

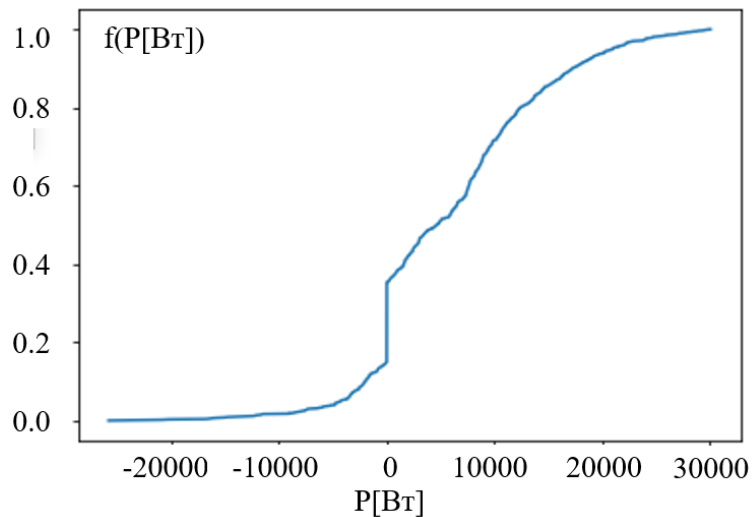


Рисунок 2 – Функция распределения изменения мощности во время прохождения ТС цикла *WLTP Class 1*

По данной функции с 95%-ным доверительным уровнем статистической значимости было определено, что для движения выбранного ТС необходима суммарная мощность тяговых двигателей более 30 кВт. Из линейки стандартных *BLDC*-двигателей фирмы «Golden Motor» был выбран двигатель *HPM-20K*.

Кроме того, был произведен выбор буферного накопителя энергии (БНЭ) ТС. Во время эксплуатации транспортного средства с индукционным источником питания расстояние между источником напряжения и приёмником может измениться (особенности рельефа, объезд препятствий). Это приведет к изменению питающего напряжения и снижению качества управления транспортным средством.

Для предотвращения таких ситуаций предлагается использовать в системе БНЭ, который будет заряжаться во время движения ТС над силовой линией и обеспечивать питание системы тягового электропривода в случае съезда с неё.

С целью выбора необходимой энергоемкости БНЭ была построена соответствующая функция распределения при движении ТС по заданному циклу (рисунок 3).

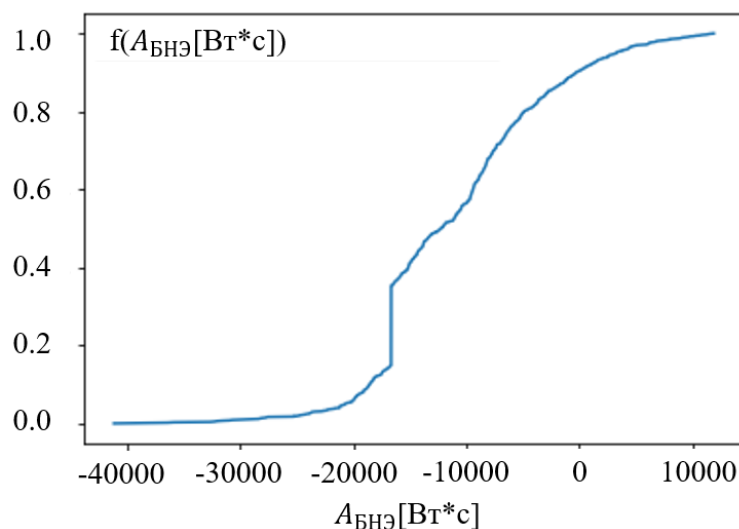


Рисунок 3 – Функция распределения изменения необходимой энергоемкости БНЭ во время прохождения заданным ТС цикла *WLTP Class 1*

Учитывая необходимость поддержания уровня энергии в БИП в любой момент времени в интервале  $[A_{\text{БНЭ.}min}, A_{\text{БНЭ.}max}]$ , требуемая энергоёмкость батареи  $A_{\text{БНЭ.}треб}$  может быть определена исходя из доверительного уровня статистической значимости:

$$A_{\text{БНЭ.}треб} = A_{\text{БНЭ}}[f(0,95)] - A_{\text{БНЭ}}[f(0,05)].$$

Алгоритмы расчёта необходимых технических характеристик двигателей и БНЭ были описаны в виде программного кода на языке программирования Python и зарегистрированы в качестве объекта интеллектуальной собственности.

**Третья глава** посвящена синтезу системы управления тяговым электроприводом автономного транспортного средства с бесконтактным подводом энергии, а также моделированию синтезированной системы и верификации разработанных математических моделей.

В работе было получено математическое описание источника бесконтактного подвода энергии от кабеля, заложенного в дорожное полотно (рисунок 4).

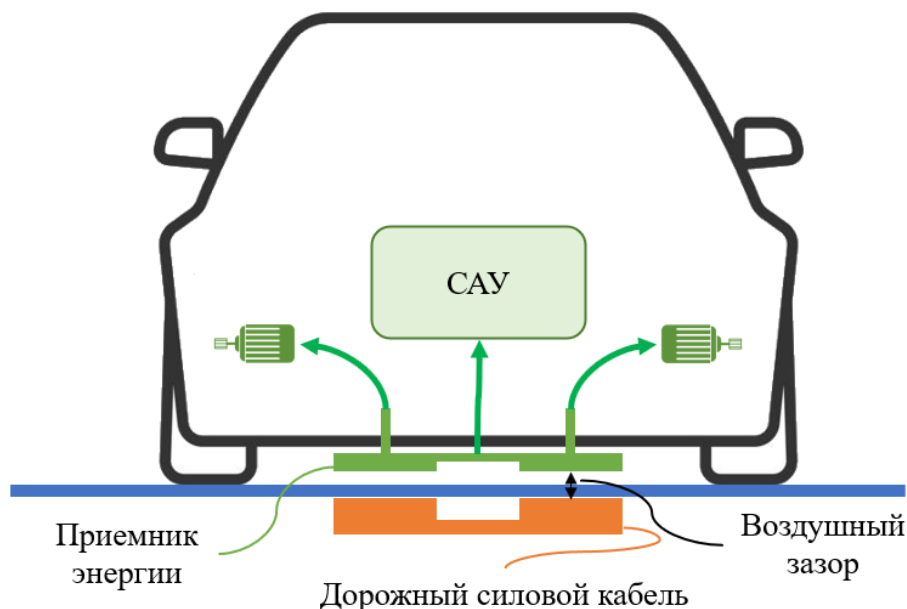


Рисунок 4 – Схематическое изображение системы индукционного подвода энергии

Такое устройство предложено описать в виде однофазного двухобмоточного трансформатора с воздушным зазором. Силовой кабель в дорожном полотне играет роль первичной обмотки трансформатора, а энергоприёмник на автомобиле – вторичной обмотки. Отличием от классической системы математических уравнений является учёт воздушного зазора, величина которого может изменяться:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= w_1 S_1 \frac{db_1}{dt} + L_{p1} \frac{di_1}{dt} + i_1 r_1 \\
 u_2 &= w_2 S_2 \frac{db_2}{dt} + L_{p2} \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 \\
 F &= \frac{l_{34}(\xi)}{S_{34} \mu_0} b_{34} + \sum_{i=1}^2 \frac{l_i}{S_i \mu_{0i}} b_i = i_1 w_1 + i_2 w_2 \quad , \\
 \Phi &= bS \\
 h &= \frac{b}{\mu_0}
 \end{aligned}$$

где  $w_1, w_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора,  $i_1, i_2$  – токи в первичной и вторичной обмотках,  $r_1, r_2$  – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток,  $L_{p1}, L_{p2}$  – индуктивные сопротивления обмоток трансформатора,  $F$  – магнитодвижущая сила,  $h_1, h_2$  – напряженности магнитного поля на стороне первичной и вторичной обмотки трансформатора,  $h_3, h_4$  – напряженности магнитного поля в воздушном зазоре магнитной цепи,  $\xi$  – случайный параметр, который зависит от положения ТС в пространстве и влияет на величину воздушного зазора,  $l_1, l_2$  – длина магнитных сердечников,  $l_{34}(\xi)$  – длина воздушного зазора,  $b_1, b_2, b_{34}$  – значения магнитной индукции в сердечнике и в зазоре,  $S_1, S_2, S_{34}$  – площадь поперечного сечения сердечника и воздушного зазора,  $\mu_0, \mu_{0i}$  – величины магнитной проницаемости воздушного зазора и ферромагнитного сердечника на стороне первичной и вторичной обмоток. На основе приведенного математического описания была составлена структурная схема источника бесконтактной передачи энергии как элемента системы автоматического управления (рисунок 5).

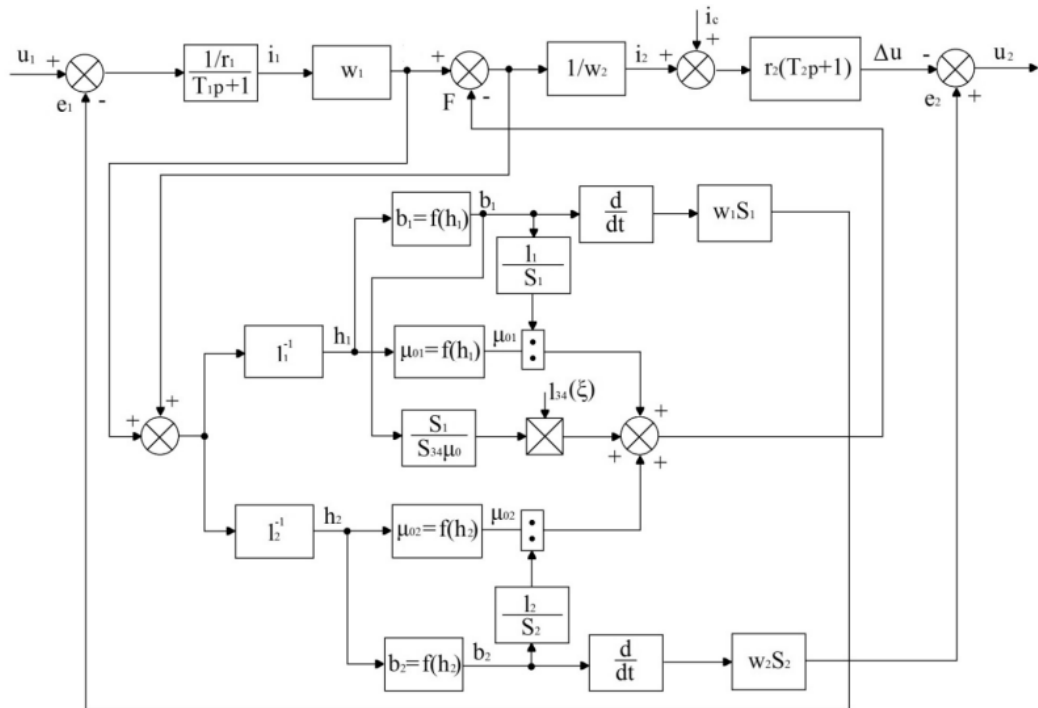


Рисунок 5 – Структурная схема трансформатора с воздушным зазором

Верификация результата была проведена путём исследования броска тока намагничивания при включении трансформатора в сеть в режиме холостого хода.

Для этого сравнивались переходные процессы, полученные при экспериментальных исследованиях реального трансформатора и при структурном и имитационном моделировании в среде *MATLAB Simulink*.

Полученный в результате проведения имитационного моделирования переходный процесс (рисунок 6) качественно и количественно совпадает с результатами проведенного эксперимента с указанным трансформатором.

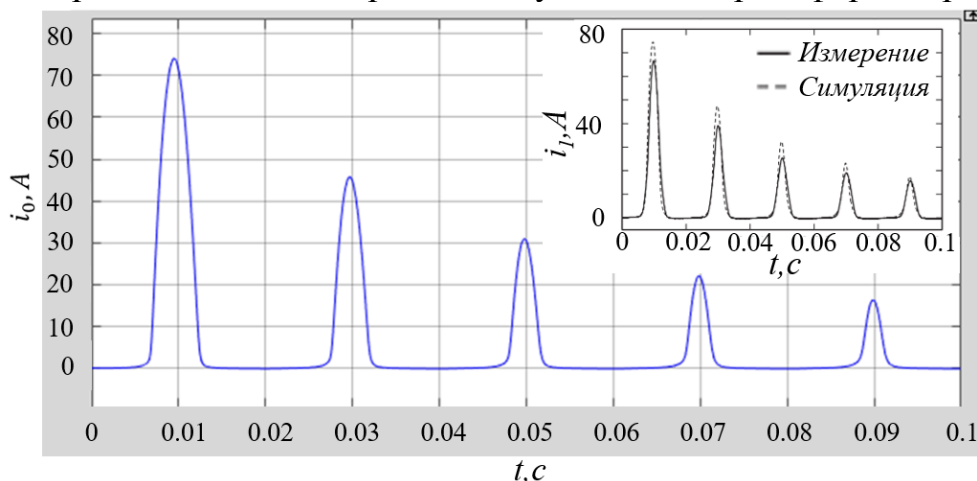


Рисунок 6 – Ток первичной обмотки трансформатора в режиме пуска на холостом ходу

Таким образом, была доказана возможность использования созданной имитационной модели в качестве эталонного образца для дальнейших исследований.

Далее было проведено сравнение результатов моделирования в режиме пуска на холостом ходу однофазного трансформатора на имитационной и структурной моделях (рисунок 7).

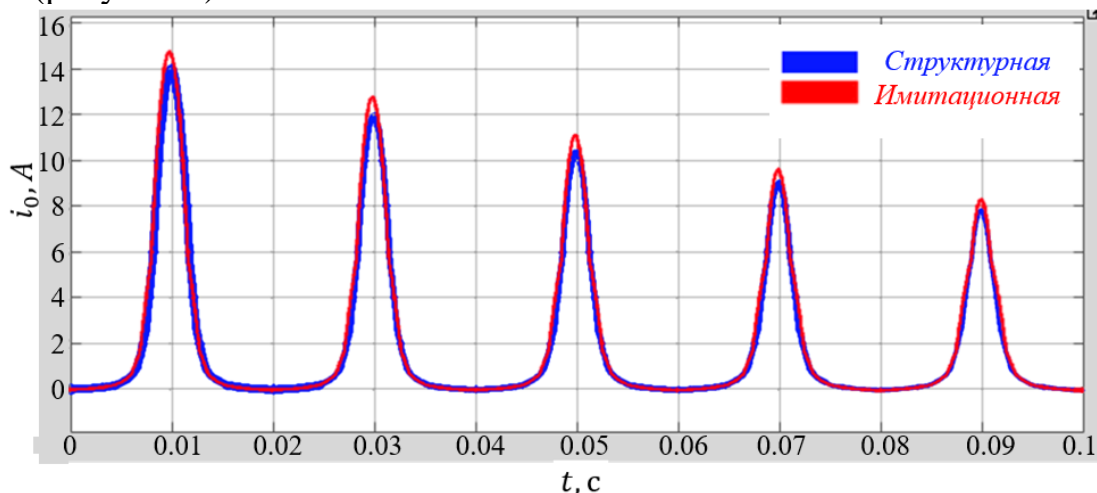


Рисунок 7 – Токи первичной обмотки трансформатора в режиме пуска на холостом ходу для структурной и имитационных моделей

Полученные кривые переходных процессов также оказались качественно и количественно идентичны для структурной и имитационной моделей.

На разработанной имитационной модели проведено исследование изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора от величины воздушного зазора. За основу был взят трансформатор мощностью 15 кВт с частотой питающего напряжения 60 кГц.

Результаты моделирования показали, что зависимость напряжения от длины воздушного зазора линейна и в данной конфигурации при изменении ширины зазора от 0 до 1 метра темп падения напряжения составляет 12 В/м.

Полученные результаты подтверждаются техническими спецификациями производителей систем бесконтактной передачи энергии. Следовательно, разработанная модель может быть использована для исследования систем тягового ЭП с индукционным подводом энергии.

Наибольшую эффективность управления нестационарными объектами обеспечивают системы с глубокими обратными связями. Они позволяют регулировать не только статическую точность, но и показатели качества переходных процессов САУ.

Для данного объекта управления была синтезирована трехконтурная САУ (рисунок 8). Регуляторы напряжения, момента и скорости были синтезированы методом СПР. Функционально использование регулятора скорости необходимо в случае создания беспилотного автономного ТС; при наличии в кабине управления пилота, который управляет ТС, контур регулирования скорости теряет смысл и может быть отключен, при этом управляющее воздействие от пилота будет напрямую поступать на регулятор момента.

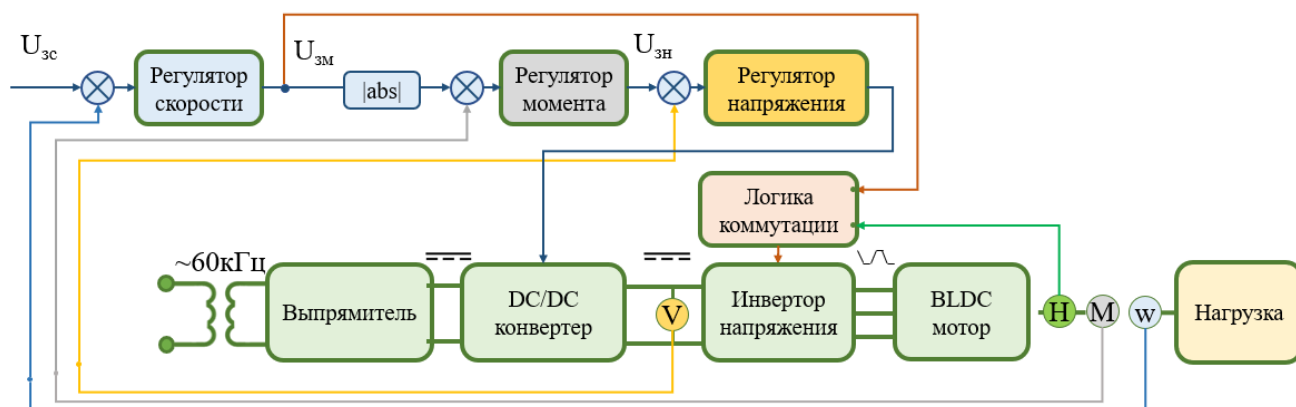


Рисунок 8 – Структурная схема САУ исследуемого объекта управления

САУ с глубокими обратными связями требует наличия измерений текущих значений переменных состояния тягового ЭП. В частности, регулятор момента требует измерения крутящего момента на валу.

В качестве более экономичной альтернативы по сравнению с датчиками для оценки текущего значения момента в работе предложено использование рекуррентной нейронной сети. Обучение однослойной нейросети с 64 нейронами и 7 задержками было произведено по методике «с учителем», т.е. с наличием тренировочного размеченного датасета с прямым соответствием набора косвенных величин и целевых показателей.

Для доказательства работоспособности такой схемы был использован пакет *MATLAB Neural Networks*. Были получены характеристики тока, напряжения и частоты вращения двигателя во время запуска созданной имитационной модели в соответствии с сигналами задания линейной скорости по циклу *WLTP Class 1*. В качестве целевых значений были использованы соответствующие измерения, полученные с датчика момента.

В результате тренировки среднеквадратичная ошибка на тестовом датасете составила  $0.99 \text{ Н*м}$ , что составляет 2% от номинального момента двигателя. Таким образом, может быть сделан вывод о том, что данный метод позволяет производить оценку момента по косвенно измеренным характеристикам с достаточной точностью без вреда процессу регулирования.

В рамках поиска энергоэффективных методов регулирования в системах тягового электропривода был разработан нейрорегулятор момента с применением технологии глубокого обучения нейронных сетей с подкреплением. Для создания нейрорегулятора был выбран *Actor-Critic* метод для непрерывных сред *TD3*.

Обратная связь из рабочей среды представлена измеренным моментом, сигналом ошибки регулирования момента и накопительной ошибкой. Целевая функция  $Q$  настроена на минимизацию среднеквадратичной ошибки и работу без аварийных прерываний, которые предусмотрены при превышении измеренного момента над максимальным моментом выбранного двигателя:

$$Q = \int_0^T 10dt - error^2 - (10^6 \text{ if } stop > 0 \text{ else } 0).$$

В результате исследования на участке стандартного цикла *WLTP Class 1* была произведена оценка качества регулирования момента методом измерения интегральной ошибки (рисунок 9). В итоге интегральная ошибка регулирования момента с применением нейрорегулятора меньше на 30,4%, чем у регулятора, синтезированного методом СПР. При этом наблюдается выигрыш в потреблённой энергии на 25,8%. Классический регулятор показал лучшие результаты при работе с прямым направлением вращения магнитного поля *BLDC* двигателя, но меньшую стабильность во время активных переключений направления вращения магнитного поля и подтормаживания ТС.

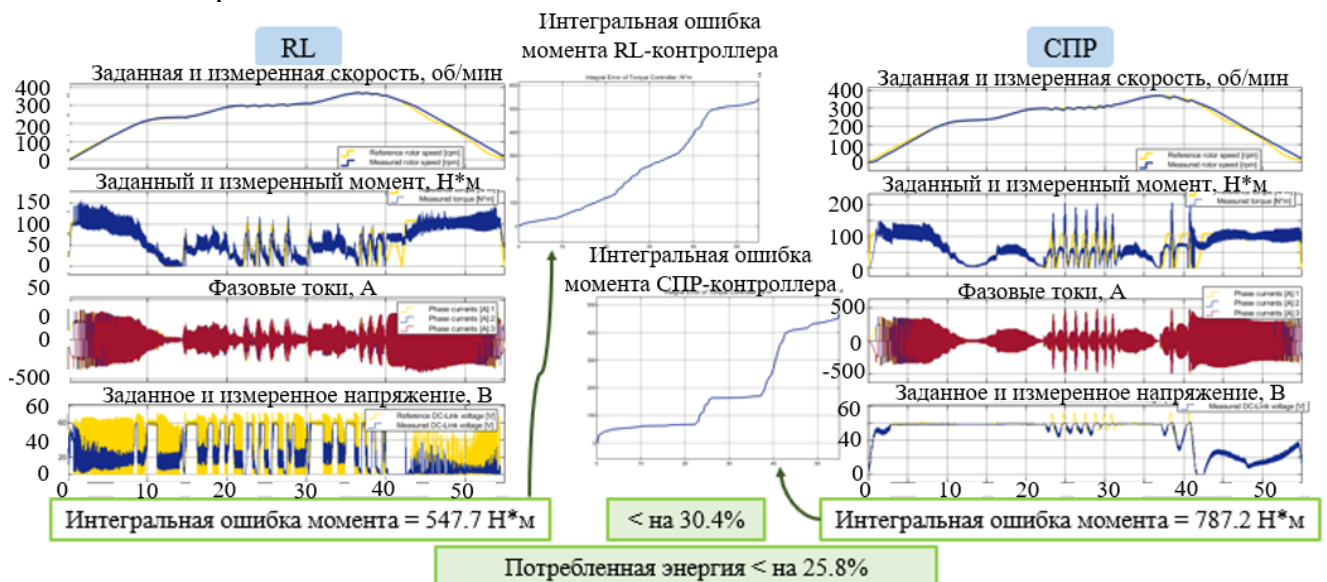


Рисунок 9 – Результаты исследования переходных процессов в системе тягового электропривода с нейрорегулятором (RL) и классическим регулятором (СПР)

Для проверки энергоэффективности предлагаемой комбинированной установки было проведено моделирование работы всей системы с буферным накопителем энергии (рисунок 10).

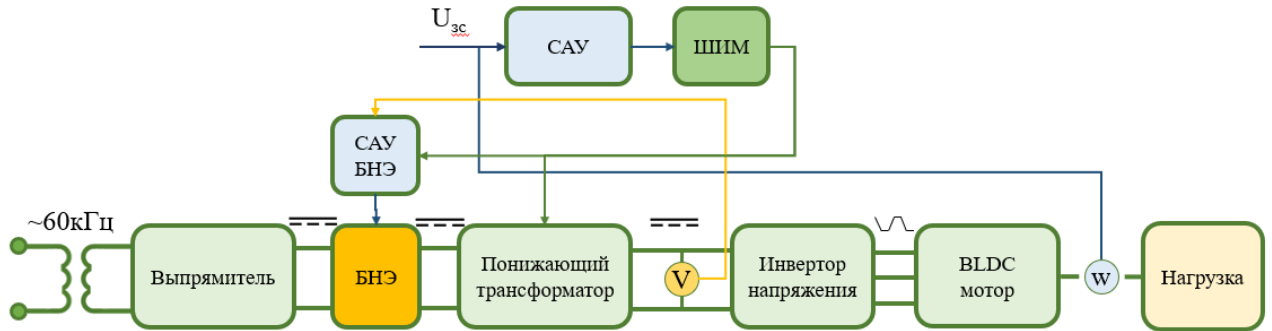


Рисунок 10 – Схема системы тягового электропривода с наличием буферного накопителя энергии.

Во время движения над питающей линией происходит процесс зарядки накопителя. Отдача энергии производится в случае съезда с питающей линии или понижения величины питающего напряжения до уровня ниже требуемого системой автоматического управления тяговым электроприводом.

Моделирование переходных процессов с БНЭ (рисунок 11) показало, что:

- За счет использования БНЭ выравнивается ток и поддерживается управляемость ТС.
- Использование БНЭ позволяет уменьшить броски тока. В схеме с БНЭ бросок тока при восстановлении питающего напряжения меньше в 3 раза. Без БНЭ ток достигает максимальных значений токоограничения.

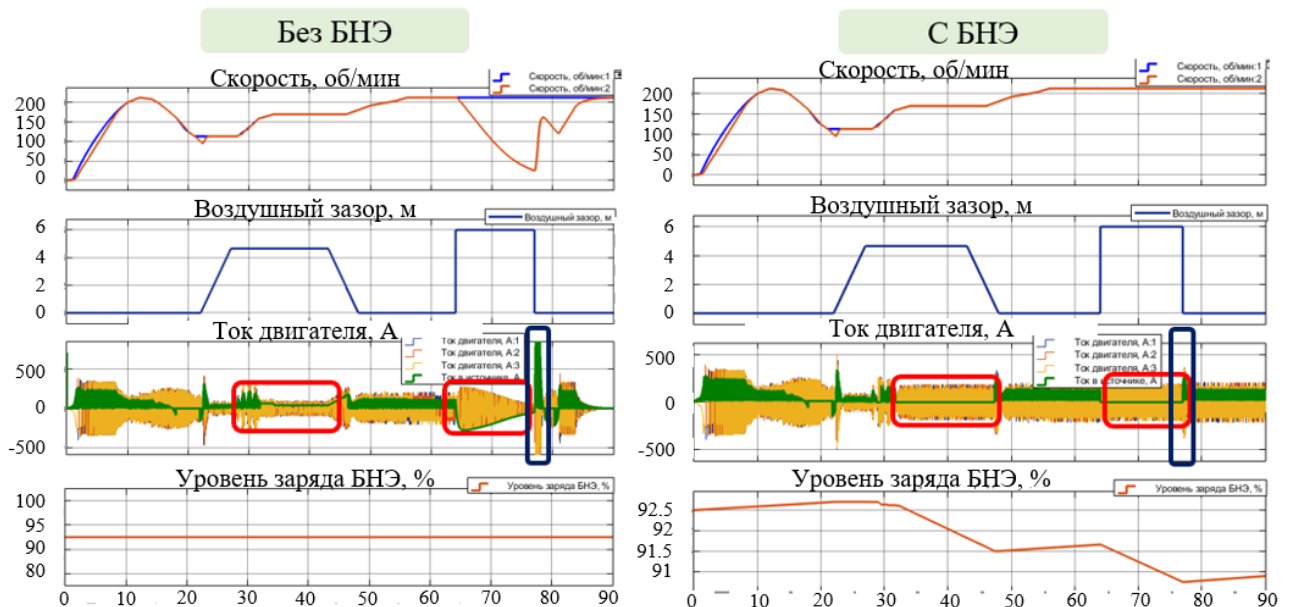


Рисунок 11 – Сравнение переходных процессов в тяговом электроприводе с БНЭ и без БНЭ.

Таким образом, в работе доказано, что использование БНЭ позволяет компенсировать провалы напряжения в питающей линии, а также сократить потери энергии за счёт ограничения бросков тока.



**Четвертая глава** посвящена разработке энергооптимальной системы автономной навигации ТС.

Основное назначение навигационной системы — генерировать опорные сигналы для электроприводов колес, которые, в свою очередь, обеспечивают желаемое поведение двигателей и системы в целом (рисунок 12).



Рисунок 12 – Структурная схема системы управления автономного ТС

Навигационная система основана на восприятии окружающего пространства с помощью датчиков. Модуль *SLAM* (*Simultaneous Localization and Mapping*) генерирует карту рабочего пространства для транспортного средства и представление о текущем положении относительно построенной карты на основе информации о состоянии окружающей среды.

Навигационная система отслеживает движение транспортного средства на верхнем уровне управления. Система автоматического управления электроприводами обеспечивает оптимальное регулирование на нижнем уровне.

В качестве критериев оптимальности управления автономным ТС принимают минимальный расход электроэнергии и минимальную длину пути до финальной точки на безопасном расстоянии до объектов окружающей среды. При работе в смежном с человеком пространстве более весомым является вычисление безопасной траектории движения, поэтому вначале вычисляется желаемая траектория, а затем происходит отработка движения с минимальным энергопотреблением.

Планирование движения транспортного средства предложено выполнять с использованием метода искусственных полей потенциалов. Распределение потенциалов рассчитывается на основе данных, полученных от датчиков.

Общий потенциал  $U(q)$  складывается из двух компонент: притягивающей к цели  $U_a(q)$  и отталкивающей от препятствий  $U_r(q)$ :

$$U(q) = U_a(q) + U_r(q).$$

Для удобства предложено использовать допущение о том, что ТС является абсолютно жестким телом, соответственно его состояние можно описать с помощью вектора  $q = \begin{pmatrix} v \\ \omega \\ \theta \end{pmatrix}$ , описывающего текущую конфигурацию контрольной точки на ТС в виде совокупности линейной скорости  $v$ , угловой скорости  $\omega$  и угла поворота относительно начала координат  $\theta$ .

Итоговый путь строится на основе отрицательного градиента суммарного значения искусственных полей в рабочем пространстве  $-\nabla U(q)$ .

При этом планирование движения осуществляется двумя подсистемами планирования: глобальным планировщиком (движение к цели) и локальным планировщиком (объезд препятствий и возвращение к глобальному треку). Траектория рассчитывается таким образом, чтобы транспортное средство благополучно миновало препятствие и снова возвращалось на заданную траекторию.

Для обеспечения энергоэффективности объезда препятствия и обеспечения минимального потребления энергии от БНЭ предлагается использовать метод динамического программирования в ограниченной окрестности локального плана, вычисленного методом искусственных потенциальных полей. Размер ячеек, ширина окрестности, величины  $\Delta q$  выбираются исходя из вычислительной мощности бортового компьютера ТС.

Для поиска наиболее эффективного решения задачи навигации в выделенной окрестности вычисляется траектория с  $\min(\int_0^t P dt)$ , где  $P$  – потребляемая мощность от ИП.

Представленная система навигации исследована на реальной установке в компании *GLK Robotics* в Академгородке, г. Новосибирск (рисунок 13). Навигация осуществлялась с использованием двух камер глубины *Intel Realsense d435i* и одной трекинговой камеры *Intel Realsense t265*. Программные модули с алгоритмами навигации были реализованы на базе *ROS (Robotic Operative System)*. В ходе эксперимента была доказана применимость метода искусственных потенциалов к задачам навигации.

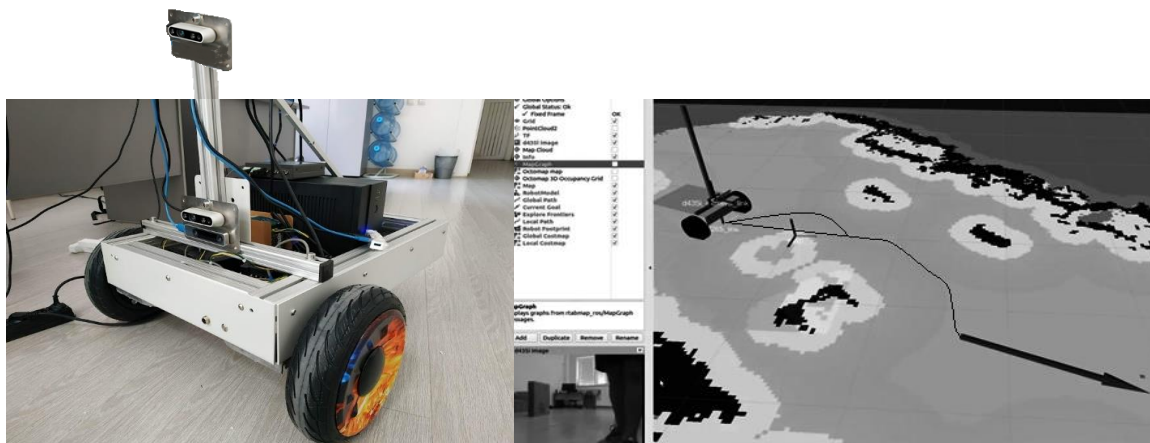


Рисунок 13 – Экспериментальная установка и результат эксперимента по навигации

Также был проведён эксперимент по измерению точности локализации с одной и двумя камерами глубины. В ходе серии измерений тележка смещалась на 1 метр в произвольном направлении и замерялась точность локализации произведенного смещения в вычислительной среде бортового компьютера. Результаты экспериментов представлены на рисунке 14.

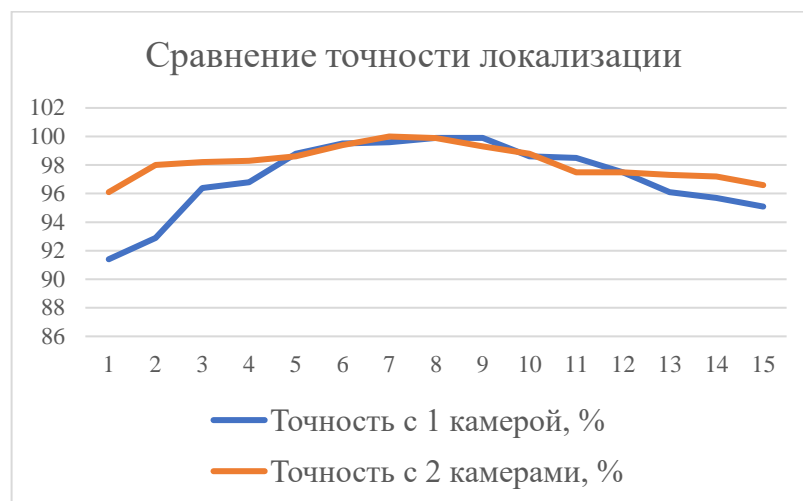


Рисунок 14 – Сравнение точности локализации при использовании одной и двух камер глубины

Результаты эксперимента доказывают, что система *SLAM* на основе нескольких камер глубины позволяет осуществлять более точную и стабильную локализацию ТС в пространстве по сравнению с одной камерой. Это даёт выигрыш для решения поставленных в работе задач, т.к. повышение точности навигации ТС в пространстве позволит сэкономить энергию на отработку корректирующих действий системы (подкручивание колес).

**В заключении** представлены полученные в ходе выполнения работы результаты:

- Рекомендована компоновка системы тягового электропривода на основании выбранного цикла движения транспортного средства, позволяющая повысить энергоэффективность ТС.

- Выбраны тяговый двигатель и буферный накопитель энергии на основании статистических методов расчета. Алгоритм расчета зарегистрирован в качестве объекта интеллектуальной собственности.

- Предложено математическое описание источника бесконтактного подвода энергии как элемента системы автоматического управления, позволяющее анализировать динамические характеристики транспортного средства при изменении параметров ИП.

- Разработан наблюдатель для оценки момента тягового электропривода на основе искусственных нейронных сетей, который использован для построения бездатчиковой системы управления.

- Синтезирован нейрорегулятор момента тягового электропривода с применением методики обучения нейронных сетей с подкреплением, в результате применения которого энергопотребление сократилось на 25,8%.

- Разработана система управления автономной навигацией ТС, соответствующая критериям безопасности и энергоэффективности для обеспечения безаварийной эксплуатации транспортного средства.

Представленные в работе математическое описание источника бесконтактного подвода энергии, методики синтеза нейросетевых регуляторов тягового электропривода, а также нейросетевых наблюдателей переменных

состояния имеют большое научно-техническое значение. Дальнейшее совершенствование теоретических исследований и практическая отработка предлагаемых алгоритмов энергоэффективного управления могут способствовать ускорению роста отечественной экономики.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Публикации из списка ВАК:**

1. Аносов В. Н., Орел Е. О., Саидов С. А., Ярославцев М. В. Расчет оценки мощности тягового электропривода с помощью искусственных нейронных сетей // Научно-технический журнал «Электропитание». - 2019. - №4. - С. 42-50.
2. Аносов В. Н., Орел Е. О., Попов Н.С. Способы обеспечения безопасности движения автономного электрического транспортного средства // Вопросы электротехнологии: науч.-техн. журн.. - 2021. - №4 (33). - С. 65-73.
3. В.Н. Аносов, В.М. Кавешников, Е.О. Орел Структурное и имитационное моделирование источника питания как элемента системы управления // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – №9. – С. 448-453.
4. Аносов В.Н., Орел Е.О. Разработка энергоэффективного нейрорегулятора момента тягового электропривода методом обучения с подкреплением // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – №5. – С. 212-216.

#### **Публикации из списка базы Scopus:**

1. V.N. Anosov, E.O. Orel, N.S. Popov Methods of ensuring motion safety of autonomous electric vehicle // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – №281.

#### **Прочие публикации:**

1. Е.О. Орел, В.Н. Аносов Расчёт параметров тягового электродвигателя и буферного накопителя энергии автономного транспортного средства на основе заданного цикла движения, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023616536 от 29.03.2023 г. // Федеральный институт промышленной собственности URL: <https://fips.ru/EGD/d82ef078-9e7f-4a15-84b4-bfd06376c382> (дата обращения: 28.05.2023).
2. Орел Е. О. Система тягового электропривода транспортного средства с индуктивным подводом энергии / Е. О. Орел ; науч. рук. В. М. Кавешников // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 5. – С. 157-161. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-3418-5, ISBN 978-5-7782-3423-9 (ч. 5).
3. Орел Е. О. Источник питания для индуктивного подвода энергии как элемент системы управления / Е. О. Орел, В. М. Кавешников // Интеллектуальный потенциал Сибири (РНСК) : сб. науч. тр. 26 регион. науч. студ. конф., Новосибирск, 22–24 мая 2018 г. : в 2 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 638-639. - 35 экз. - ISBN 978-5-7782-3563-2, ISBN 978-5-7782-3565-6.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № Р-02545 Подписано в печать 12.10.2023 г